

УДК 533.9.082

В.К. ГОНЧАРОВ, К.В. КОЗАДАЕВ, В.И. ПОПЕЧИЦ, М.В. ПУЗЫРЕВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ

At the present work some regularities of the processes proceeding under the action of laser and gamma radiation on a substance were investigated. The results of this research work allow one to develop and to optimize new technologies of metal processing by laser irradiation and new methods of gamma radiation dosimetry.

С момента создания лазеров, способных разрушать различные материалы, начались экспериментальные исследования по взаимодействию мощного электромагнитного излучения с веществом и развитие лазерных технологий обработки материалов.

С этой целью, а также для оптимизации режимов обработки металлов и сплавов в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ разработаны и сконструированы: автоматизированная установка на основе неодимового лазера с уникальными параметрами, позволяющая получать высокоэнергичные импульсы (до 1,5 кДж) лазерного излучения практически любой наперед заданной формы; установка на основе рубинового лазера для измерения параметров твердых и жидкых частиц размерами на два порядка меньше длины волны зондирующего излучения при их движении в реальном масштабе времени; лазерная установка, генерирующая импульсы лазерного излучения длительностью ~200 нс с энергией до 20 Дж; установка для получения лазерным способом оптически прозрачных сред с наночастицами металлов; установка для нанесения тонких алмазоподобных пленок лазерным способом на различные поверхности.

Общая схема экспериментальной установки по изучению взаимодействия мощного лазерного излучения с металлами подробно описана в [1]. На рис. 1 представлены различные формы лазерных импульсов, которые использовались в настоящей работе.

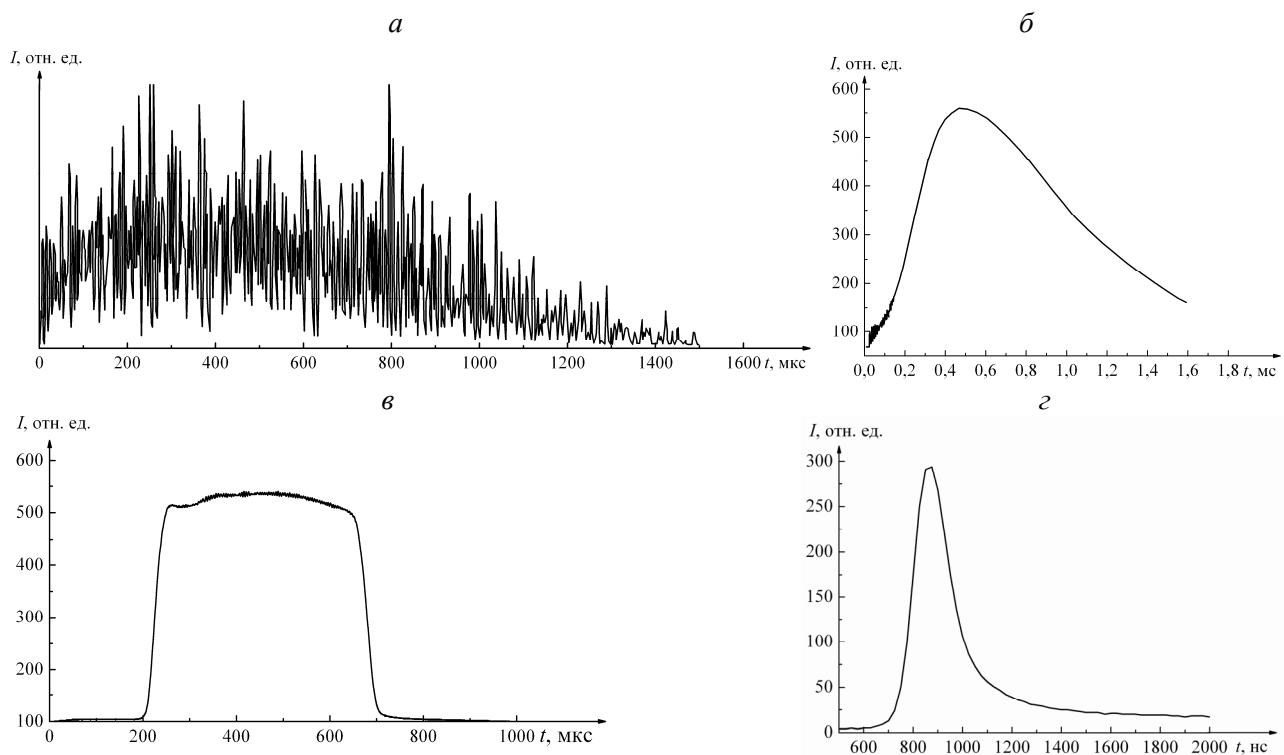


Рис. 1. Временная форма лазерных импульсов: *а* – режим свободной генерации в резонаторе Фабри – Перо, *б* – режим свободной генерации в конфокальном резонаторе с применением временного сдвига накачки усилителей, *в* – «механическое вырезание» части импульса, *г* – режим модулирования добротности резонатора с помощью вращающейся призмы полного внутреннего отражения ( $I$  – относительная интенсивность лазерного импульса,  $t$  – время)

Физические процессы, происходящие внутри металла при поглощении им лазерного излучения, заключаются в следующем. Поглощение падающего на поверхность излучения происходит в тонком слое  $10^{-5} \div 10^{-6}$  см, причем ответственны за это электроны проводимости. В дальнейшем за счет неупругих соударений с ионами металла они передают кристаллической решетке энергию, полученную от лазерного излучения. Вследствие этого в приповерхностном слое металла начинает действовать мощный тепловой источник, который нагревает данный материал до температуры плавления, а затем и до температуры кипения. В результате начинается процесс поступления паров металлов в окружающую среду.

Пороговая плотность мощности падающего светового потока, необходимая для формирования эрозионного факела в атмосфере воздуха, для большинства металлов заключена в пределах  $10^5 \div 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Некоторая часть паров ионизируется, образуя эрозионный лазерный факел из паров и плазмы материала мишени. Первоначально этот факел считался практически прозрачным для излучения [2].

Однако эксперименты по одновременному контролю спектроскопических характеристик плазмы эрозионного факела и его зондирования излучением вспомогательного рубинового лазера при воздействии на цинковую мишень излучения неодимового лазера при различных плотностях мощности светового потока показали, что в этих условиях поглощение плазмы незначительно [3]. Также показано [3], что основные

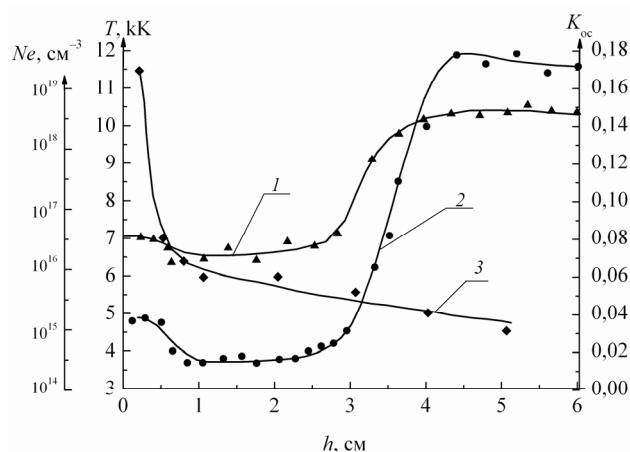


Рис. 2. Временные зависимости: 1 – концентрации электронов, 2 – температуры плазмы, 3 – коэффициента ослабления зондирующего излучения вдоль оптического разряда ( $h$  – расстояние до поверхности мишени)

потери лазерного излучения определяются поглощением и рассеянием на частицах мелкодисперсной жидкокапельной фазы материала мишени, формирующихся за счет объемного парообразования. Более наглядно это проявляется при исследовании самоподжигающегося импульсного оптического разряда [4, 5]. На рис. 2 представлены изменения концентрации электронов  $N_e$ , температуры плазмы  $T$  и коэффициента ослабления  $K_{oc}$  зондирующего излучения вдоль оптического разряда. Очевидно, что потери зондирующего излучения не связаны с основным механизмом потерь в плазме (обусловленным носителями зарядов), а определяются поглощением и рассеянием на жидкокапельных частицах материала мишени.

В связи с этим понятен интерес к изучению механизмов формирования в эрозионных лазерных факелах частиц жидкокапельной фазы материала мишени и их влияния на параметры и динамику эрозионных лазерных факелов.

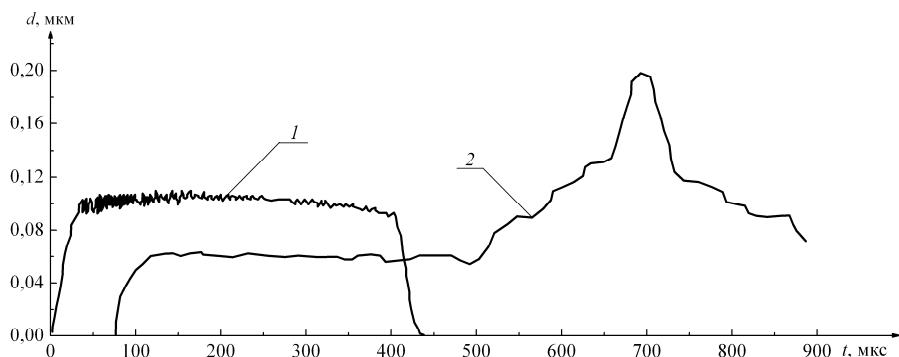


Рис. 3. Временная форма импульса воздействующего излучения – 1 и зависимость диаметров  $d$  частиц жидкокапельной фазы от времени – 2

Исследования, проведенные на наших лазерных установках, впервые позволили установить, что для каждого металла существует определенный диапазон плотности мощности воздействующего излучения, в котором уже с самого начала образования эрозионного факела в приповерхностную область поступает мелкодисперсная жидкокапельная фаза материала мишени за счет объемного парообразования. Обнаружена смена механизма образования частиц, и в конце лазерного импульса в эрозионный факел поступают крупные жидкые капли за счет гидродинамического механизма (рис. 3).

Обнаружены временные задержки относительно начала лазерного воздействия поступления в эрозионный лазерный факел частиц жидкокапельной фазы, сформированных за счет объемного парообразования. Показано, что первоначально факел состоит из прозрачных для лазерного излучения свечущихся паров, затем с некоторой задержкой, зависящей от материала мишени и плотности мощности воздействующего излучения, в него поступают частицы жидкокапельной фазы, сформированные за счет механизма объемного парообразования [6].

Формирование мелкодисперсной жидкокапельной фазы материала мишени происходит при различной пространственно-временной структуре лазерного импульса. Размеры частиц слабо зависят от модуляции лазерного импульса, а концентрация частиц тем выше, чем больше модуляция воздействующего излучения [7].

Экспериментально определена приоритетность факторов, способствующих объемному парообразованию в лазерных мишениях; для реальных металлов формирование эрозионного факела с мелкодисперсной жидкокапельной фазой материала мишени в результате объемного парообразования облегчается прежде всего за счет растворенных в металле газов и пространственно-временной неоднородности лазерного излучения. Действие этих двух факторов соизмеримо. Следующий фактор – наличие в металле различных включений и искусственных центров. При отсутствии этих трех факторов процессу объемного парообразования способствуют структурные неоднородности. И наконец, при отсутствии всех этих факторов жидкокапельная фаза образуется за счет взрыва метастабильной жидкости или из-за неустойчивости фронта испарения [8].

Обнаружено и изучено новое явление – низкопороговый лазерный пробой. Частицы жидкокапельной фазы, двигаясь навстречу лазерному лучу, уменьшаются в размерах в результате доиспарения, образуя вокруг себя более плотную среду, чем при адиабатическом разлете прозрачных паров; при достижении определенной плотности мощности, характерной для каждого металла, в эрозионном

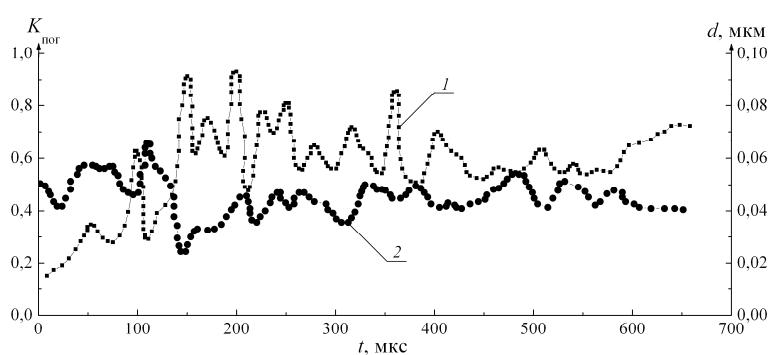


Рис. 4. Временные зависимости: 1 – коэффициента поглощения  $K_{\text{пог}}$  зондирующего излучения в плазме, 2 – эффективного диаметра частиц жидкокапельной фазы

казано, что в процессе движения в поле лазерного излучения частиц жидкокапельной фазы материала мишени, сформированных за счет объемного парообразования, вследствие конкуренции процессов доиспарения и дробления на некотором расстоянии наблюдается максимум концентрации частиц. Расстояние, на котором это происходит, зависит от материала мишени и от плотности мощности воздействующего излучения, при увеличении которой максимум концентрации частиц смещается к поверхности мишени [10].

Показано [11], что во внешнем электрическом поле с увеличением его напряженности вследствие стимуляции дробления размеры частиц жидкокапельной фазы в эрозионном факеле уменьшаются (рис. 5).

В результате исследования кинетики частиц конденсированной фазы эрозионных лазерных факелов в скрещенных лазерных пучках [12] установлено, что воздействием излучения вспомогательного лазера можно эффективно управлять параметрами частиц жидкокапельной фазы, а значит, и параметрами самих эрозионных лазерных потоков вплоть до полного исчезновения капель.

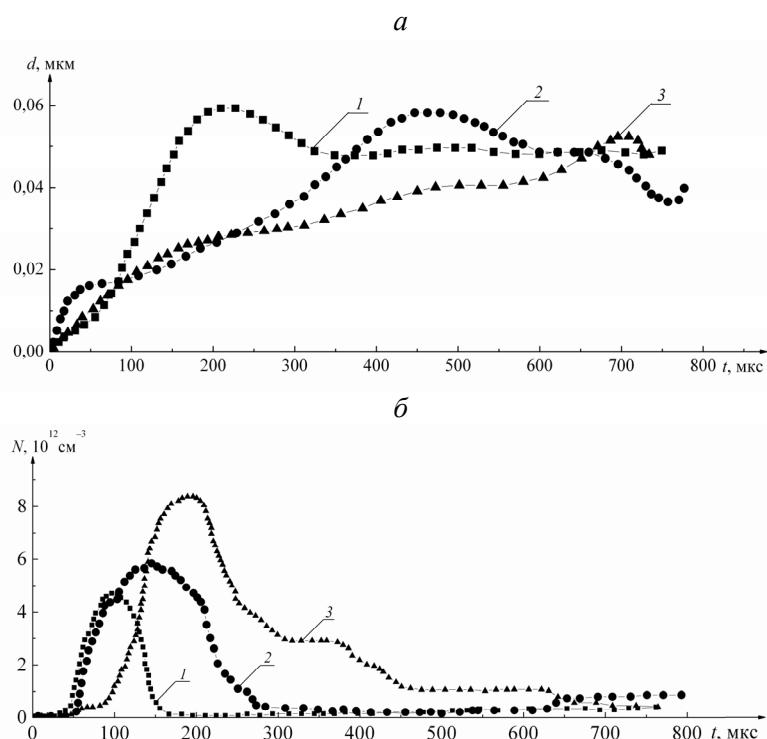


Рис. 5. Зависимость от времени: а – эффективного диаметра частиц жидкокапельной фазы: 1 – без применения внешнего электростатического поля, 2 – при напряженности поля 1 кВ/см, 3 – 4 кВ/см; б – концентрации  $N$  частиц жидкокапельной фазы: 1 – без применения внешнего электростатического поля, 2 – при напряженности поля 1 кВ/см, 3 – 4 кВ/см

лазерном факеле происходит низкотемпературная плазменная вспышка (пробой), инициируемая частицами жидкокапельной фазы (рис. 4) [9].

Воздействием лазерного излучения на пористые металлические мишени получены управляемые двухфазные потоки, исследования которых позволили рекомендовать материал для сильнопроводящих, но слаборазрушающихся лазерных разрядников.

Впервые было обнаружено дробление частиц жидкокапельной фазы эрозионных лазерных факелов. По-

следствии конкуренции процессов

доиспарения и дробления на некото-

ром расстоянии наблюдается макси-

мум концентрации частиц. Расстоя-

ние, на котором это происходит, зави-

сит от материала мишени и от плот-

ности мощности воздействующего

излучения, при увеличении которой

максимум концентрации частиц сме-

щается к поверхности мишени [10].

Для этого требуются значитель-

но меньшие плотности мощности

излучения доиспаряющего лазера,

чем воздействующего (рис. 6).

Установлена возможность зна-

чительного снижения плотностей

мощности, необходимых для доис-

парения частиц жидкокапельной

фазы эрозионных лазерных факелов

металлов вспомогательным лазером

в скрещенных лазерных пучках. С

этой целью эрозионный лазерный

факел металлической мишени по-

мещают во внешнее электрическое

поле. Результаты экспериментов

могут быть применены для полу-

чения «стерильной» бескапельной

плазмы для нанесения пленок в из-

делиях микроэлектронной техники.

Комплексные исследования с по-

мощью разработанной методики по

лазерному зондированию и с исполь-

зованием стандартных скоростных,

интерферометрических, спектроско-

пических методов применения

разработанной системы автомати-

зированного сбора, хранения и

обработки информации в оптико-физическом эксперименте позволили экспериментально обосновать более адекватную действительности модель разрушения металлов под действием лазерного излучения умеренной интенсивности, учитывающую в продуктах эрозии мелкодисперсную жидкокапельную фазу материала мишени, и найти пределы ее применимости (таблица).

Содержащиеся в таблице данные позволяют выбрать технологические режимы как для скоростной лазерной обработки, так и для премиационной [13].

Визуализировано движение частиц жидкокапельной фазы материала мишени, сформированных гидродинамическим механизмом при лазерной эрозии металлов длительными (100÷1000 мкс) прямоугольными лазерными импульсами. Установлено, что частицы движутся под небольшим углом к поверхности мишени (15÷35°), составляя динамическую корону.

Эффект различия направления разлета более крупных (1÷100 мкм) и более мелких (10÷100 нм) частиц жидкокапельной фазы использован для получения наноразмерных частиц металлов. С этой целью применена операция пространственного сепарирования пучка частиц во время их формирования в эрозионном факеле металлической мишени. Путем осаждения наиболее мелких частиц в воду получены суспензии наночастиц металлов. Этот способ запатентован [14-16].

**Порог плотности мощности излучения для формирования эрозионного факела с мелкодисперсной жидкокапельной фазой: 1 – за счет объемного парообразования, 2 – режим плазменной вспышки**

Материал мишени	Плотность мощности импульса лазерного излучения, МВт/см <sup>2</sup>			
	со 100 % модуляцией		с плавной огибающей	
	1	2	1	2
Цинк	0,9	2,65	2,0	5,4
Олово	–	–	0,7	3,0
Свинец	0,3	0,9	0,9	3,2
Кадмий	0,7	1,9	1,0	3,5
Магний	0,7	2,2	–	–
Висмут	0,25	2,15	–	–
Алюминий	1,0	3,0	–	–
Никель	1,6	3,3	–	–
Медь	4,0	1,2	–	–
Титан	0,7	1,1	–	–
Вольфрам	2,6	4,2	–	–
Молибден	1,7	4,8	–	–
Цирконий	2,6	5,6	–	–

Контроль характеристик водных суспензий металлов осуществлялся по комплексной методике, включающей лазерное зондирование, спектроскопию плазмонного резонанса, просвечивающую электронную микроскопию и атомно-силовую микроскопию. Разработана методика, позволяющая контролировать наноразмерные частицы металлов в прозрачных твердых телах и жидкостях, в том числе во время их формирования.

Экспериментально показано, что в процессе лазерной эрозии металлов с помощью импульсов субмикросекундной длительности и при высокой плотности мощности ( $10^8$ ÷ $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) в эрозионных

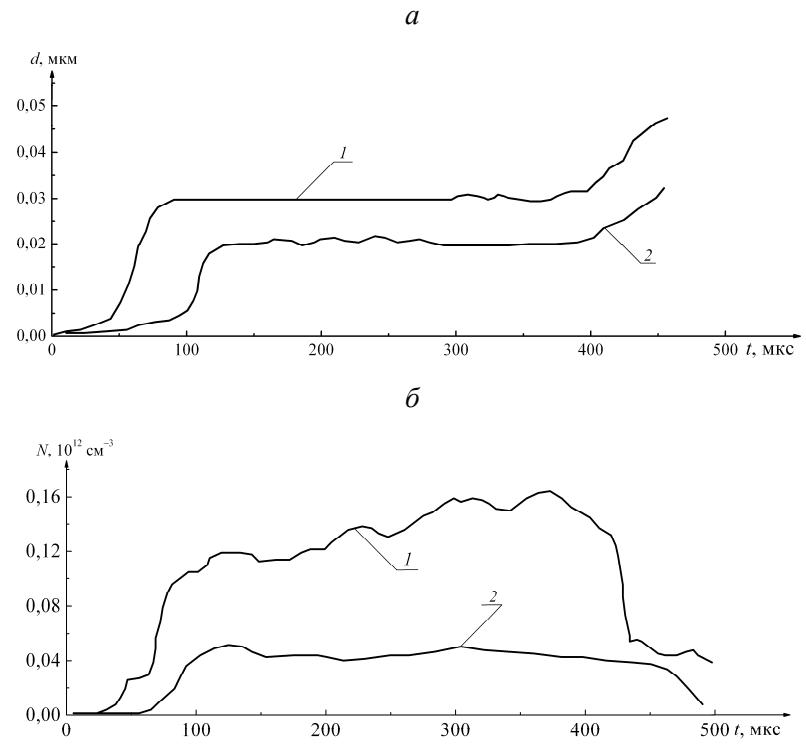


Рис. 6. Зависимость от времени: *а* – эффективного диаметра частиц жидкокапельной фазы: 1 – без применения доиспаряющего лазера, 2 – с применением вспомогательного лазера; *б* – концентрации частиц жидкокапельной фазы: 1 – без применения доиспаряющего лазера, 2 – с применением вспомогательного лазера

плазменных факелах формируется жидкокапельная фаза материала мишени с частицами 20÷150 нм в зависимости от типа металлов при отсутствии более крупных частиц, свойственных режиму лазерной эрозии металлов длительными импульсами умеренной плотности мощности. Основным механизмом формирования наноразмерных частиц конденсированной фазы металлов при воздействии на них высокоинтенсивных субмикросекундных лазерных импульсов является конденсация из паров эрозионного лазерного факела. На основе данного эффекта реализован лабораторный вариант промышленного процесса получения водных суспензий металлов (Ag, Ni, V, Zn, Co) со средними размерами частиц ~ 50 нм [17].

Создана установка для нанесения тонких алмазоподобных пленок лазерным способом на различные поверхности. В результате исследований, проведенных с использованием данной установки, разработана технология осаждения алмазоподобных пленок лазерным методом на различные материалы. Получены структуры с высоким удельным сопротивлением и высоким содержанием  $sp^3$ -связи в покрытии. Отработана соответствующая методика упрочнения сверхтонких дисков (диаметром 75 мм, толщиной 40 мкм), предназначенных для распиловки природных кристаллов алмазов. Данная технология позволяет увеличить стойкость дисков в 1,5 раза по сравнению с дисками, изготовленными по традиционной технологии. При этом температура в зоне распила уменьшается на 30÷40 %. Этую технологию можно использовать и для получения обрабатывающих поверхностей ограночных дисков [18].

Данные результаты создают научную базу для разработки эффективных технологий создания защитных упрочняющих и диэлектрических углеродных покрытий с использованием лазерно-плазменного метода. Такие покрытия могут найти применение для повышения срока службы узлов трения машин и прецизионных приборов, для защиты магнитного слоя компьютерных дисков памяти и магнитных головок, в медицинской промышленности – для повышения срока службы медицинского инструмента, в качестве защитных слоев оптических элементов, а также защитных коррозионностойких биологически индифферентных слоев на поверхности хирургических имплантантов. Кроме того, алмазоподобные углеродные пленки являются одним из наиболее технологичных диэлектриков, которые используются в настоящее время в микроэлектронике.

Уже говорилось о высокоэнергетическом воздействии, когда энергия одного фотона не слишком значительна, но число этих фотонов в импульсе излучения велико. Однако возможно воздействие электромагнитного излучения на вещество, когда число фотонов невелико, но энергия каждого большая. В данной работе источником излучения являлся  $^{60}\text{Co}$ .

Твердые и жидкие растворы органических красителей имеют интенсивные полосы поглощения и люминесценции в видимой области спектра и поэтому представляют собой удобные модельные объекты радиационных исследований. Проведенное спектрально-люминесцентными методами изучение воздействия гамма-излучения на растворы красителей различных классов позволило сделать вывод, что необратимая радиационная деструкция красителей в растворах происходит в результате взаимодействия молекул красителей с обладающими большой окислительной способностью кислородсодержащими радикалами и ион-радикалами, образующимися в результате радиолиза растворителей [19–22]. Поэтому для повышения радиационной стойкости растворов красителей следует добавлять в растворы ловушки радикалов (ионол, роданид калия и др.); применять в качестве растворителей твердые полимерные матрицы (поливиниловый спирт, полистирол, полиметилметакрилат и др.) или растворители, обладающие большой вязкостью; проводить обескислороживание растворов; использовать растворители, молекулы которых не содержат атомов кислорода (например, диметиламин, диэтиламин).

Показано, что по необратимому уменьшению со временем интенсивности длинноволновой полосы поглощения красителя под действием гамма-излучения можно определить величину радиационной дозы, воздействовавшей на раствор. Таким образом, растворы красителей, обладающие низким федингом, могут служить детекторами радиационной дозы и использоваться для радиоэкологического мониторинга техногенных объектов и окружающей среды. Детекторы на основе красителей просты в эксплуатации, имеют низкую стоимость, не требуют источников питания. Однако при проведении точных (с точностью до 3 %) измерений радиационной дозы с помощью раствора красителя необходимо записывать на спектрофотометре спектр поглощения облученного раствора. Визуально по обесцвечиванию раствора (на основе сравнения с предварительно построенной градуировочной цветовой шкалой) можно судить о величине воздействовавшей на раствор интегральной радиационной дозы с точностью примерно 15 % [23–25].

Увеличить точность визуального определения интегральной радиационной дозы можно путем использования многокомпонентного раствора, состоящего из растворителя и нескольких красителей, поглощающих в различных спектральных участках видимой области спектра и обладающих различными скоростями радиационной деструкции. Такой раствор будет не только обесцвечиваться при облучении, его цвет будет приближаться к цвету раствора наиболее радиационно-стойкого красителя. Первоначальный цвет многокомпонентного раствора можно варьировать за счет концентрации красителей. Практически для приготовления многокомпонентного раствора достаточно использовать два органических красителя, один из которых поглощает в коротковолновой, а другой – в длинноволновой области видимого спектра. Очевидно, что красители в данном растворителе не должны химически взаимодействовать друг с другом и с продуктами радиационной деструкции.

Спектральными методами исследовано влияние гамма-излучения  $^{60}\text{Co}$  на оптические свойства трехкомпонентных растворов, спектроскопически чистых, поглощающих в длинноволновой и коротковолновой области видимого спектра ряда красителей. Для определения фединга растворов двух красителей были проведены исследования зависимости интенсивностей спектров поглощения наполовину обесцвеченных растворов (по красителю, поглощающему излучение в длинноволновой области видимого спектра) от времени хранения раствора в темноте (до 80 сут).

Наименьшим федингом обладали водные растворы: метиленовый голубой + кислотный алый, кислотный ярко-голубой 3 + родамин-6Ж, бриллиантовый зеленый + родамин С, метиленовый голубой + флуоресцеин, малахитовый зеленый + кислотный алый. В водных растворах этих пар красителей также не наблюдается химического взаимодействия красителей между собой и с продуктами радиационной деструкции. Поэтому водные растворы указанных пар красителей могут успешно использоваться с целью визуального определения радиационной дозы в диапазоне 30÷5000 Гр [26-28]. Для практического применения достаточно нескольких капель раствора, находящихся в запаянном стеклянном сосуде, помещенном в непрозрачный пакет, чтобы исключить фотодеструкцию красителей. По визуально определяемому (на основе сравнения с предварительно построенной градуировочной цветовой шкалой) изменению цвета многокомпонентного раствора можно судить о величине интегральной радиационной дозы, воздействовавшей на раствор. Точность такого определения согласно проведенным оценкам составляет 8÷10 %.

1. Гончаров В. К. // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 5. С. 146.
2. Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В. Действие лазерного излучения большой мощности на металлы. М., 1970.
3. Гончаров В. К., Карабань В. И., Колесник А. В. // ЖПС. 1985. Т. 43. № 3. С. 389.
4. Гончаров В. К., Лопарев А. Н., Минько Л. Я. // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. № 6. С. 2111.
5. Гончаров В. К., Карабань В. И., Колесник А. В., Ложкин В. А. // КЭ. 1984. Т. 11. № 4. С. 784.
6. Гончаров В. К., Пузырев М. В. // Опт. журн. 1996. № 2. С. 75.
7. Гончаров В. К., Карабань В. И., Концевой В. Л., Стасюлевич Т. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55. № 6. С. 1168.
8. Гончаров В. К., Концевой В. Л., Пузырев М. В. // ИФЖ. 1994. Т. 66. № 6. С. 662.
9. Бык А. П., Гончаров В. К., Заходий В. В. и др. // КЭ. 1989. Т. 16. № 5. С. 1042.
10. Гончаров В. К., Концевой В. Л., Пузырев М. В. // Там же. 1995. Т. 22. № 3. С. 249.
11. Гончаров В. К., Иовлев А. В., Пузырев М. В., Сметанников А. В. // II Междунар. конф. по лазер. физике и спектроскопии: Тез. докл. Гродно, 1995. С. 242.
12. Гончаров В. К., Пузырев М. В. // КЭ. 1997. Т. 24. № 4. С. 329.
13. Гончаров В. К., Чернявский А. Ф. // ЖПС. 2004. Т. 71. № 3. С. 372.
14. Гончаров В. К., Козадаев К. В., Пузырев М. В., Славашевич Д. Л. // ИФЖ. 2008. Т. 81. № 2. С. 211.
15. Гончаров В. К., Козадаев К. В., Маркевич М. И. и др. // Там же. 2008. Т. 81. № 2. С. 206.
16. Гончаров В. К., Козадаев К. В., Пузырев М. В. Лазерный способ получения суспензий наночастиц металлов с помощью пространственного сепарирования: пат. 10974 Респ. Беларусь, МПК (2006) B 22 F 9/00, B 22 F 9/06, B 82 B 1/00, B 22 B 3/00; заявитель Ин-т прикл. физ. проблем им. А.Н. Севченко БГУ. № а 20061267; заявл. 13.12.2006; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтелектуал. уласнасці. 2008. № 4. С. 172.
17. Гончаров В. К., Козадаев К. В., Пузырев М. В., Стецик В. М. // ИФЖ. 2009. Т. 82. № 4. С. 638.
18. Гончаров В. К., Киселев М. Г., Пузырев М. В., Минченя В. Т. // Там же. 1999. Т. 72. № 5. С. 1004.
19. Попечиц В. И. // Спектроскопия и люминесценция молекулярных систем. Мн., 2002. С. 275.
20. Попечиц В. И. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2002. № 3. С. 33.
21. Попечиц В. И. // ЖПС. 2003. Т. 70. № 1. С. 34.
22. Попечиц В. И., Кравцова О. Н. // Применение молекулярной люминесценции и спектроскопии к исследованию структуры и свойств вещества / Под ред. Д.С. Умрейко, А.А. Минько. Мн., 2006. С. 53.
23. Попечиц В. И. // Сахаровские чтения 2006 г.: экологические проблемы XXI века: Материалы 6-й Междунар. науч. конф. Мн., 2006. С. 101.

24. Попечиц В.И. // Экологические проблемы западного региона Беларуси: Сб. науч. ст. Гродно, 2007. С. 191.
25. Попечиц В.И., Сержанович Е.И. // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации: Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 2007. С. 205.
26. Попечиц В.И. // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 7-й Междунар. конф. Мин., 2007. С. 392.
27. Попечиц В.И. // Техника и технологии: инновации и качество: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Барановичи, 2007. С. 405.
28. Попечиц В.И. // Актуальные проблемы экологии: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Гродно, 2008. С. 165.

Поступила в редакцию 02.12.09.